



MESURE DES PERTES THERMIQUES NOMINALES DU MODELE THERMIQUE DU CRYOSTAT (CTM)

Darve Ch.

1. Introduction

Le Modèle Thermique du Cryostat (CTM) permet de mesurer les pertes thermiques aux différents niveaux de température du cryostat de l'aimant du dipôle LHC. La partie centrale du CTM est un cryostat de 10 mètres, alimenté en hélium par l'intermédiaire d'un dispositif cryogénique contenu dans les boîtes d'alimentation en hélium et de retour qui sont situées aux extrémités du module.

Le but de cette note est de rendre compte des mesures des pertes thermiques des deux extrémités du module aux différents niveaux de température, par rapport au budget thermique global mesuré sur le CTM complet. Ces mesures ont été effectuées en juillet-août 1998.

2. Caractéristiques de l'expérience

La manipulation zéro, décrite ci-dessous, permet de calibrer les tests réalisés avec le montage complet du CTM [1, 2, 3], intégrant le cryostat (Fig. 1).

Ce test est nécessaire, car les mesures du CTM ne permettent pas d'isoler les entrées parasites de chaleur, dues à la conduction entre le séparateur de phase et la pseudo masse froide de 10 mètres, ainsi que les pertes dues à la présence des deux vannes cryogéniques et de la jauge de niveau d'hélium (Fig. 2).

Le banc de tests proposé (Fig. 3) nous permet de mesurer les pertes thermiques aux trois niveaux de température du cryostat, à savoir : 1.9 K, 5-20 K et 50-75 K.

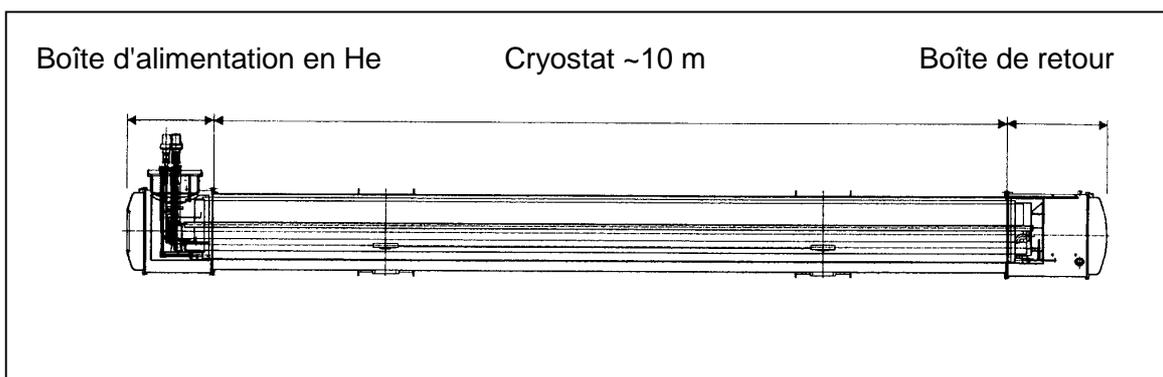


Figure 1: Vue longitudinale du Modèle Thermique du Cryostat LHC (CTM)

Les pertes thermiques sur le circuit à 1.9 K sont mesurées par la méthode du "boil-off". Ainsi, la connaissance du débit d'He saturé à 16 mbar, mesuré à l'aspiration du groupe de pompage, nous permet de déterminer les pertes thermiques globales à 1.9 K.

L'étude porte principalement sur la mesure de ces pertes thermiques à 1.9 K.

Afin de dissocier les pertes thermiques à 1.9 K du cryostat LHC des entrées parasites de chaleur, la pseudo masse froide de 10 m est remplacée par une pseudo masse froide factice de 500 mm (Fig. 4).

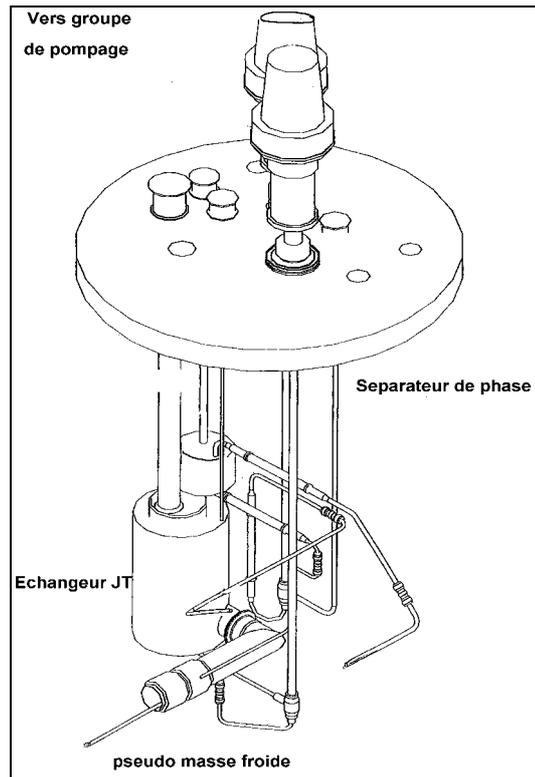


Figure 2 : Systèmes cryogéniques de la boîte d'alimentation en hélium

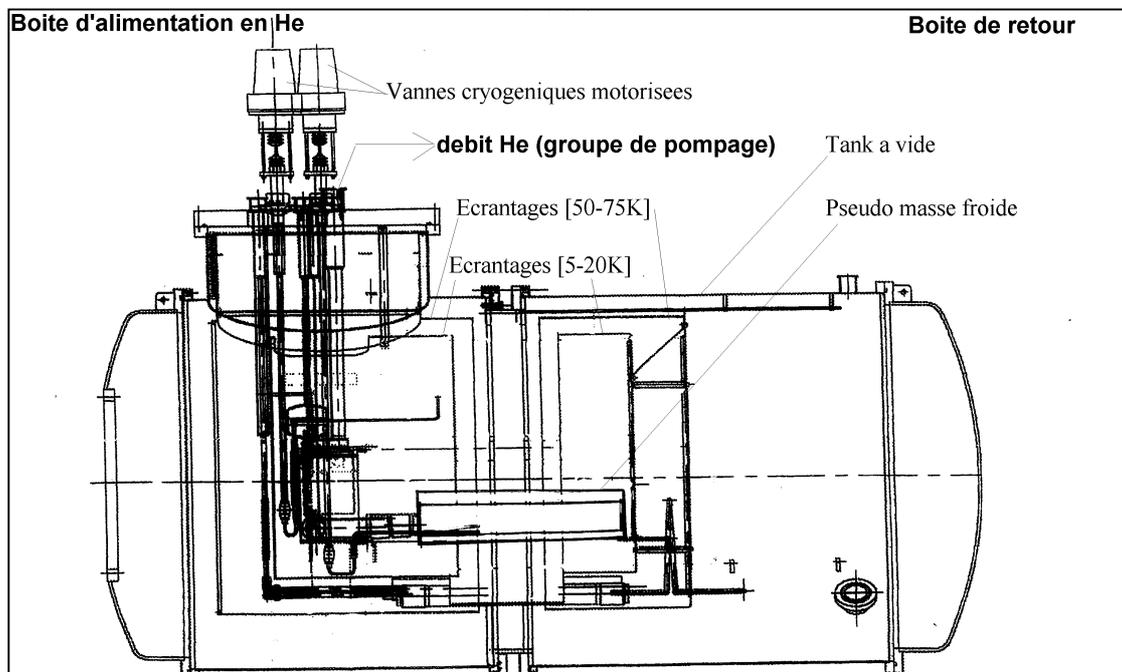


Figure 3 : Présentation de la manipulation zéro

2.1 Spécification technique

Les extrémités du module (boîte d'alimentation en hélium et boîte de retour) sont isolées du cryostat de 10 mètres.

Afin de reproduire les mêmes conditions d'utilisation que pour le test en grandeur réelle, le système d'isolation thermique des boîtes d'extrémités est identique. Vingt couches de superisolation recouvrent les deux écrantages refroidis activement par les circuits d'hélium gazeux à 5-20 K et 50-75 K.

Dans le cryostat testé, le circuit à 1.9 K se compose uniquement du système cryogénique de la boîte d'alimentation, relié hydrauliquement à la pseudo masse froide factice par l'intermédiaire de tubes en acier inoxydable et de gyrolocks. Seul le circuit à 1.9 K nécessite un nouveau concept (Fig. 4). Un support en polyéthylène isole thermiquement la pseudo masse froide factice de l'écrantage à 5-20 K. Un anneau en acier inoxydable est doublé d'une bandelette de polyéthylène, afin de sécuriser la pseudo masse froide factice. Une couche de superisolation entoure cette pseudo masse froide.

Les longueurs thermiques entre les différents éléments critiques sont respectées.

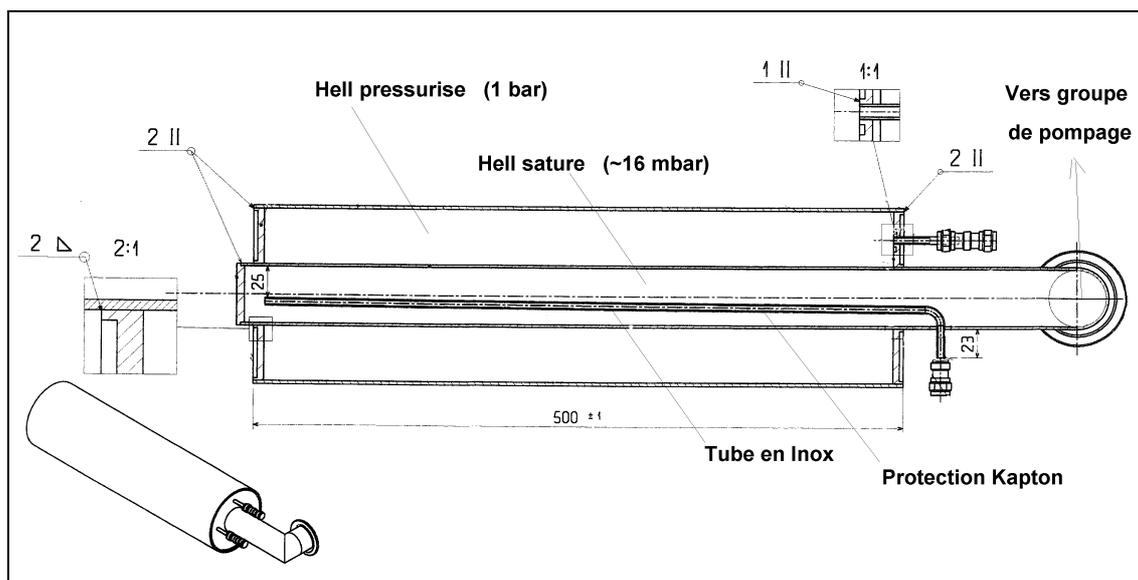


Figure 4 : Détails de la pseudo masse froide factice

2.2 Fonctionnement

La ligne de transfert d'hélium liquide depuis un dewar de 500 l, les quatre lignes de retour d'hélium au gazomètre et une ligne reliée au groupe de pompage (180 m³/h) sont connectées sur la boîte d'alimentation (Fig. 2). L'hélium liquide se déverse dans le séparateur de phase, puis alimente les lignes C' [5-20 K] et E [50-75 K], à l'état gazeux.

Comme pour le CTM complet, le principe des deux bains d'hélium superfluide (saturé et pressurisé) nous permet de mesurer les pertes thermiques du cryostat à 1.9 K.

L'utilisation d'un bain d'HeII saturé est rendue possible, grâce au pompage à 16 mbar sur le bain d'hélium à 1.8 K et grâce à la détente adiabatique provoquée par la vanne JT. Un réservoir contenant six litres d'HeII pressurisé transfère les pertes thermiques du cryostat à 1.9 K, au bain d'HeII saturé. Une chaufferette permet d'apporter une puissance électrique connue à 1.9 K, afin de calibrer les pertes thermiques mesurées par "boil-off".

2.3 Instrumentation, contrôle et acquisition

Les quinze sondes de température carbone ont été calibrées et utilisées pour des mesures de température s'étendant entre 1.6 K et 30 K. Neuf sondes platine permettent de suivre le refroidissement du système et les températures des composants supérieurs à 30 K. Des vannes manuelles, sur le panneau de vannes, permettent de conditionner tout le système. Deux vannes cryogéniques, régulées par leur PIDs, contrôlent le remplissage et le fonctionnement des deux bains d'HeII de la pseudo masse froide factice. La température de l'hélium dans les lignes C' et E est stabilisée grâce à un PID régulant les puissances de chauffage, respectivement de 5 W et 100 W maximum. Des débitmètres mesurent le débit massique d'hélium relatif à chacun des circuits. Une jauge Penning mesure la pression du vide d'isolation à la température ambiante. Une jauge de niveau mesure la quantité d'HeII superfluide. Un débitmètre massique très précis [0-50 mg/s] est utilisé pour la mesure du débit d'HeII saturé à l'aspiration vers l'unité de pompage. Un système informatique permet de piloter le banc de tests grâce au programme LabVIEW, créé en collaboration avec le groupe LHC-IAS. Une trentaine de données sont enregistrées et transmises au serveur LHC, afin d'être disponibles sur le Web.

3. Modélisation théorique

Les méthodes décrites permettent de modéliser les entrées de chaleur dues à la conduction dans l'hélium superfluide entre le séparateur de phase et la pseudo masse froide. Les pertes occasionnées par l'utilisation des deux vannes cryogéniques motorisées sont aussi calculées. Les entrées de chaleur sur la pseudo masse froide, dues à la conduction dans les fils (Manganin) de lecture des sondes ou au rayonnement, sont négligeables. Seule la condition nominale en bon vide a été modélisée théoriquement.

3.1 Conduction dans l'hélium superfluide

Le transfert thermique dans ^4He superfluide peut être approché grâce à la formule $X(T)$ [4] :

$$X(T) = 520 \{1 - \exp[-3(2.16 - T)]^{2.5}\}$$

La représentation graphique de cette fonction est traduite par la figure 5.

T_f et T_c sont les températures aux extrémités froide et chaude d'un canal de section s et de longueur l .

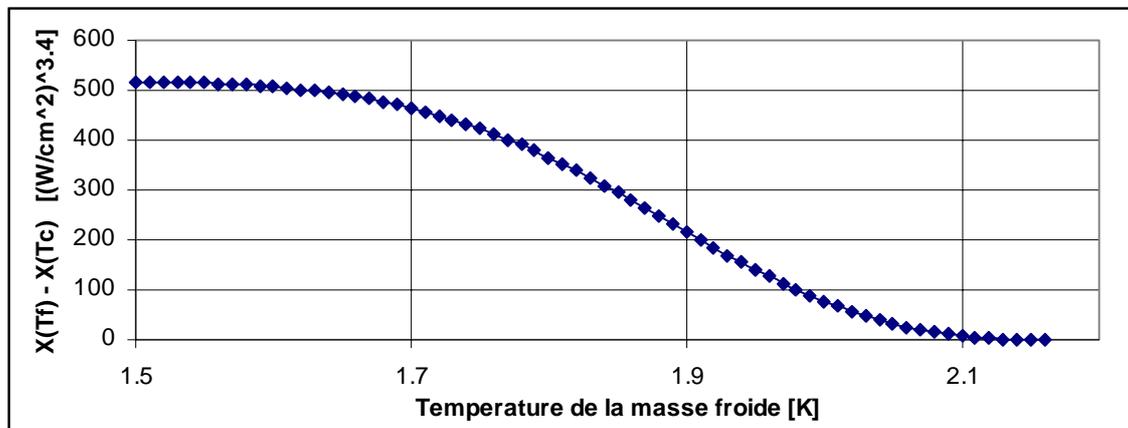


Figure 5 : Transfert thermique dans ^4He superfluide : fonction $X(T)$

La densité de flux thermique dans l'hélium superfluide est donné par l'expression suivante [4] :

$$\frac{Q'}{s} = \left[\frac{[X(T_f) - X(T_c)]}{l} \right]^{0.29}$$

Le tube en acier inoxydable (DN 4/6) a une section de 0.1256 cm^2 et une longueur thermique de 133 cm disponible entre le séparateur de phase et la pseudo masse froide. Nous ferons l'hypothèse que l'interface HeI/HeII se trouve au niveau du séparateur de phase. Dans le cas du fonctionnement en condition nominale, le flux thermique est de 180 mW.

3.2 Vannes cryogéniques et jauge de niveau d'hélium

Les deux vannes cryogéniques sont thermalisées à 80 K. En utilisant les formules de la littérature [5] et les cotes des deux vannes [6], nous pouvons calculer le transfert thermique entre 80 K et 4 K pour le corps de la vanne et entre 300 K et 4 K pour la tige seule.

Les hauteurs de tige des deux vannes étant respectivement de 1000 mm et 875 mm, les entrées de chaleur par conduction sur la pseudo masse froide sont égales à 61 mW et 72 mW.

La jauge de niveau hélium contribue de 63 mW au bilan des pertes thermiques sur le circuit à 1.9 K.

3.3 Estimation des entrées de chaleur sur la pseudo masse froide factice

Sur le circuit à 1.9 K, les entrées de chaleur totales sont représentées sur la figure 6, en fonction de la température de la masse froide. Pour des conditions de température équivalentes aux mesures réalisées pour les différentes opérations du CTM, les pertes thermiques globales calculées du circuit 1.9 K de la manipulation zéro, se montent à 376 mW.

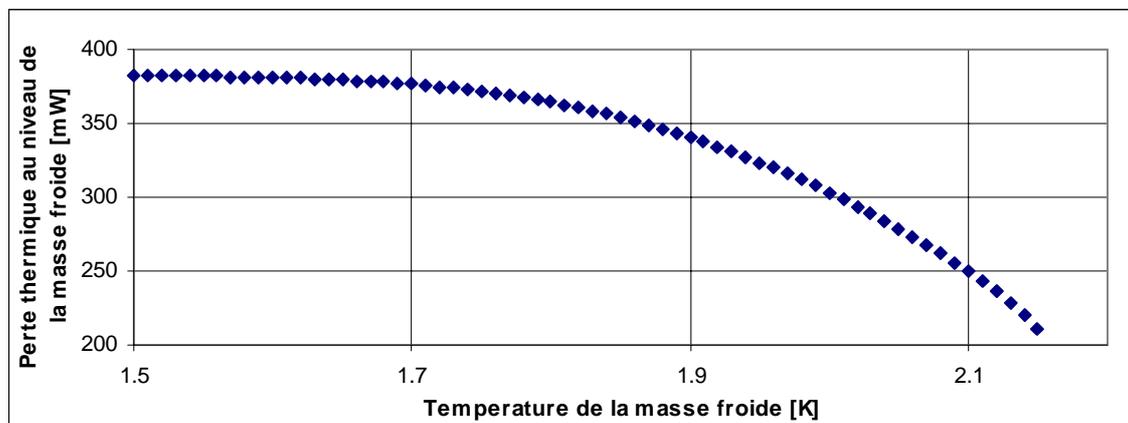


Figure 6 : Pertes thermiques parasites, en fonction de la température de la masse froide

4. Résultats expérimentaux

La campagne de tests est rendue possible grâce à la mise à disposition des infrastructures du Laboratoire central de cryogénie du CERN (Cryolab).

Afin d'être représentatif des campagnes de tests du CTM, les températures des écrantages à 5-20 K et 50-75 K sont conservées. Les débits d'hélium et les chauffages permettent de maintenir les températures des deux écrantages de la boîte de retour à 22 K et 80 K.

Pour simuler les mesures en condition nominale, la pression dans le vide d'isolation, mesurée à température ambiante, est de $3.1 \cdot 10^{-4}$ Pa. Les mesures de pertes thermiques à 5-20 K et 50-75 K sont réalisées avec une barre d'erreur de $\pm 5\%$. Pour la mesure des pertes thermiques à 1.9 K, nous obtenons $\pm 4\%$ d'erreur.

4.1 Pertes thermiques des écrantages

La méthode de mesure des pertes thermiques (Q) des écrantages refroidis activement, nécessite la connaissance de la différence de température de l'hélium entre l'entrée et la sortie de l'écrantage (ΔT), ainsi que le débit d'hélium (m) utilisé, soit la mesure de perte thermique Q' égale à :

$$Q' = m' \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Les pertes thermiques, mesurées pour les niveaux de températures 5-20 K et 50-75 K du côté boîte de retour, sont respectivement de 0.8 et 19.5 W.

4.2 Pertes thermiques du circuit à 1.9 K

Les pertes thermiques sur le circuit à 1.9 K sont relatives au débit d'HeII saturé à l'aspiration du groupe de pompage (m') et à la chaleur latente de vaporisation à 1.9 K, soit la mesure de perte thermique Q' égale à :

$$Q' = m'.L$$

Pour les conditions nominales, les pertes thermiques globales mesurées sont de 390 mW.

Dans une deuxième étape, les mesures de pertes thermiques (Tableau 1) sont effectuées avec un vide d'isolation dégradé par injection d'hélium gazeux jusqu'à atteindre des pressions de stabilisation de $1.4 \cdot 10^{-2}$ et $4.1 \cdot 10^{-2}$ Pa.

Pression du vide d'isolation [Pa]	Pertes mesurées [mW]
$3.1 \cdot 10^{-4}$	390
$1.4 \cdot 10^{-2}$	530
$4.1 \cdot 10^{-2}$	730

Tableau 1 : Mesures des pertes thermiques du circuit à 1.9 K avec dégradation du vide

5. Conclusion

La manipulation zéro du Modèle Thermique du Cryostat (version 3), décrite dans cette note, a permis de mesurer les entrées de chaleur dues aux boîtes d'extrémité aux trois niveaux de température du cryostat CTM3. Ainsi, pour la mesure des pertes thermiques du circuit à 1.9 K du CTM3, dans les conditions nominales de vide, 390 mW doivent être soustraits afin de connaître la performance thermique du cryostat LHC. Cette valeur correspond aux valeurs estimées à l'aide d'un modèle théorique simple.

Reference

- [1] Measurement and analysis of thermal performance of the LHC prototype cryostats, V. Benda, L. Dufay, G. Ferlin, Ph. Lebrun, G. Riddone, J-M. Rieubland, B. Szeless, L. Tavian and L.R. Williams, CERN/AT-95-36/CR, LHC Note 347 (1995).
- [2] Thermal performance measurements on a 10-meters long dipole prototype cryostat (Cryostat Thermal Model 2), Ch. Darve, G. Ferlin, M. Gautier, L.R. Williams, LHC Project Note 112 (1997).
- [3] Measurement and analysis of the thermal performance of the second serie of LHC prototype dipole magnet cryostats. Ch. Darve, V. Parma, L.R. Williams, To be submitted to CEC-ICMC'99 in Montreal.
- [4] Techniques de l'Ingénieur, Institut International du Froid, Cryogénie, ses applications en supraconductivité (1995).
- [5] Kryo-Vakuumtechnik Grundlagen und Anwendungen, R.A. Haefler, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York (1981).
- [6] Dossier de plan Weka AG, plans numéros : 9501617 et 950616.

Distribution :

Ball Ch.	LHC-ACR
Benda V	LHC-ACR
Bozzini D.	LHC-CRI
Brunet J.C.	LHC-CRI
Buenaventura A.	LHC-CRI
Burla P.	LHC-CRI
Casas-Cubillos J.	LHC-ACR
Cruikshank P.	LHC-VAC
Darve Ch.	LHC-CRI
Dauvergne J.P.	LHC-ECR
Dolizy F.	LHC-CRI
Ferlin G.	LHC-ECR
Gautier M.	LHC-VAC
Gröbner O.	LHC-VAC
Khomenko B.	LHC-IAS
Kowalczyk P.	LHC-CRI
Jenninger B.	LHC-VAC
Lebrun Ph.	LHC-ACR
Parma V.	LHC-CRI
Poncet A.	LHC-CRI
Rabany M.	LHC-IAS
Riddone G.	LHC-ACR
Rieubland J.M.	LHC-ECR
Rijllart A.	LHC-IAS
Rohmig P.	LHC-CRI
Rousselin A.	LHC-CRI
Sacré Ph.	LHC-CRI
Skoczen B.	LHC-CRI
Struik M.	LHC-CRI
Vandoni G.	LHC-ECR
Vauthier N.	LHC-ACR
Vuitton Ch.	LHC-CRI
Wikberg T.	EST/LEA
Willems D.	LHC-CRI
Williams L.R.	LHC-CRI